

2. Itti, L. Visual saliency / L. Itti // Scholarpedia [electronic resource]. – 2007. – Mode of access: http://www.scholarpedia.org/article/Visual_saliency, date of access: 20.10.2015.
3. Рахилина, Е.В. Когнитивный анализ предметных имен: семантика и сочетаемость / Е.В. Рахилина. – 2-е изд. – М.: Русские словари, 2008. – 416 с.
4. Методы анализа изображений для поддержки создания веб-сайтов с динамически меняющимся оформлением / И.П. Ахмадеева [и др.] // Вест. Новосибир. гос. ун-в., серия: Информационные технологии. – 2014. – № 3. – С. 6–15.
5. Рахилина, Е. В. Когнитивная семантика: история, персоналии, идеи, результаты / Е.В. Рахилина // МГУ. Семиотика и информатика. – 1998. – Т. 36. – С. 274–323.
6. Андрианов, А.И. Локализация текста на изображениях сложных графических сцен / А.И. Андрианов // Современные проблемы науки и образования: физико-математические науки. – 2013. – №3. – С. 1–7.
7. Малахов, К.А. Улучшение визуального качества изображения путем регулирования параметра квантования для стандартных кодеров сжатия / К.А. Малахов // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. – 2010. – № 7. – С. 8–14.
8. From Human Eye Fixation to Human-like Autonomous Artificial Vision / V. Kachurka [et al.] // Lecture notes in computer science / Springer International Publishing. – 2015. – Vol. 9094: Advances in Computational Intelligence. – P. 171–184.
9. Обнаружение объектов системами компьютерного зрения: подход на основе визуальной saliентности / В.А. Кочурко [и др.] // Доклады БГУИР. – 2015. – №5(91). – С. 47–54.
10. Visual Saliency Based Approach to Object Detection in Computer Vision Systems: Real Life Applications / V. Kachurka [et al.] // Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS): proceedings, Warsaw, Poland, 24–26 September 2015, in 2 volumes / IEEE. – Warsaw, 2015. – Vol. 1. – P. 239–245.
11. A Statistical Approach to Human-Like Visual Attention and Saliency Detection for Robot Vision: Application to Wildland Fires' Detection / V. Kachurka [et al.] // Communications in Computer and Information Science / Springer International Publishing. – 2014. – Vol. 440: Neural Networks and Artificial Intelligence. – P. 124–135.
12. Ramik, D.M. Hybrid salient object extraction approach with automatic estimation of visual attention scale / D.M. Ramik, C. Sabourin, K. Madani // Signal-Image Technology and Internet-Based Systems (SITIS): proceedings, Dijon, France, 28 November – 1 December 2011 / IEEE. – Dijon, 2011. – P. 438–445.
13. Ramik, D.M. Contribution to complex visual information processing and autonomous knowledge extraction: application to autonomous robotics: Ph. D. thesis / D.M. Ramik. – Université Paris-Est, 2012. – 176 p.
14. Analysis of scores, datasets, and models in visual saliency prediction / A. Borji [et al.] // IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV): proceedings, Sydney, Australia, 1–8 December 2013 / IEEE. – Sydney, 2013. – P. 921–928.
15. Van de Weijer, J. Robust optical flow from photometric invariants / J. van de Weijer, T. Gevers // IEEE International Conference on Image Processing (ICIP): proceedings, Singapore, 24–27 October 2004, in 5 volumes / IEEE. – Singapore, 2004. – Vol. 3. – P. 1835–1838.
16. Mileva, Y. Illumination-robust variational optical flow with photometric invariants / Y. Mileva, A. Bruhn, J. Weickert // Lecture notes in computer science / Springer International Publishing. – 2007. – Vol. 4713: Pattern Recognition. – P. 152–162.
17. Judd, T. A Benchmark of Computational Models of Saliency to Predict Human Fixations. / T. Judd, F. Durand, A. Torralba // MIT Technical Report [electronic resource]. – 2012. – Mode of access: <http://saliency.mit.edu/> – Date of access: 20.10.2015
18. Bruce, N. Attention based on information maximization / N. Bruce, J. Tsotsos // J. of Vision. – 2007. – Vol. 7. – № 9 – P. 950–950.
19. Saliency and Human Fixations: State-of-the-Art and Study of Comparison Metrics / N. Riche [et al.] // IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV): proceedings, Sydney, Australia, 1–8 December 2013 / IEEE. – Sydney, 2013. – P. 1153–1160.
20. Learning to predict where humans look / Judd T. [et al.] // IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV): proceedings, Kyoto, Japan, 29 September – 2 October 2009 / IEEE. – Kyoto, 2009. – P. 2106–2113.
21. Fawcett, T. An introduction to ROC analysis / T. Fawcett // Pattern recognition letters. – 2006. – Vol. 27. – № 8. – P. 861–874.
22. Contreras-Reyes, J.E. Küllback–Leibler divergence measure for multivariate skew-normal distributions / J.E. Contreras-Reyes, R.B. Arellano-Valle // Entropy. – 2012. – Vol. 14. – № 9. – P. 1606–1626.
23. Humanoid robot NAO: Review of control and motion exploration / Shamsuddin S. et al. // IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE): Penang, Malaysia, 25–27 November 2011 / IEEE. – Penang, 2011. – P. 511–516.

Материал поступил в редакцию 08.01.16

KACHURKA V.A., MADANI K., SABOURIN C., GOLOVKO V.A., KACHURKA P.A. Evolutionary-based tuning of visual saliency map calculating algorithm

A tuning problem of previously proposed combined approach of object detection in image and eye fixation probability map calculation is considered. An evolutionary-based approach can be used in problem of parameter tuning for different sets of problems. Additional experimental results show viability of this approach on the broader class of tasks as predicted previously – applied variations of eye fixation problem like real-time navigation.

УДК 004.08.01

Осолинский А.Р., Кочан О.В.

СТЕНД ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ СРЕДНЕГО ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ

Введение. Одной из актуальных задач разработки компьютерных систем с автономным питанием является увеличение времени работы без возобновления заряда аккумуляторов. Согласно [1, 2], основными путями решения этой задачи являются: 1) увеличение энергоемкости источников питания; 2) усовершенствование технологии изготовления микросхем; 3) оптимизация программного обеспе-

чения по энергопотреблению. Первые два пути требуют фундаментальных исследований, а третий – лишь оборудования для измерения энергопотребления.

Сложность измерения энергопотребления микроконтроллеров и микропроцессоров (далее МК) состоит в том, что они, из-за использования КМОП технологии, потребляют ток в виде относительно

Осолинский А.Р., преподаватель каф. информационно-вычислительных систем и управления, аспирант 4 года обучения фак-та информационных компьютерных технологий Тернопольского национального экономического университета.

Украина, 46009, г. Тернополь, Тернопольская область, ул. Львовская, 11.

Кочан О.В., к.т.н., доцент каф. информационно-измерительных технологий института компьютерных технологий, автоматизации и метрологии Национального университета «Львовская политехника».

Украина, г. Львов, ул. Степана Бандеры, 12.

коротких импульсов, привязанных к фронтам импульсов тактового генератора. Амплитуда этих импульсов может превышать постоянную составляющую тока в десятки раз, а значимая в смысле энергопотребления частота гармоник превышает 100 МГц.

Применяемые методы измерения энергопотребления МК. Первые исследования энергопотребления МК проводились [3] без учета его характера, измерялось среднее потребление без учета остаточного заряда конденсаторов в цепи питания. Полученные модели имели низкую точность (погрешность ±10% и более).

В [4] предложено измерять мгновенное значение тока потребления МК, что исключило влияние конденсатора в цепи питания на результат измерения.

Однако питаемый через "токовое зеркало" МК (для создания возможности заземления цифрового осциллографа) работает в нештатном режиме (конденсатор в цепи питания отделен от МК "токовым зеркалом").

Кроме того, напряжение питания МК, в зависимости от мгновенного тока потребления, из-за динамического сопротивления р-п переходов "токового зеркала", меняется на 0,2–0,3 В, что влияет на результат измерения. Поэтому погрешность построенных моделей энергопотребления МК достигает ±7% [2].

В [5] предложено устройство измерения мгновенного тока потребления МК, использующий как преобразователь ток - напряжение конденсатор в цепи питания МК (рис. 1). При этом МК работает в штатном режиме. По оценке [2], погрешность измерения не превышает ±0,75%.

Недостатком устройства [5] является слабая помехозащищенность из-за измерения мгновенных значений напряжения, а также накопление погрешности при измерении энергопотребления МК при выполнении фрагментов программ.

Предлагаемый метод измерения среднего энергопотребления МК. В [6] предложен метод измерения среднего энергопотребления МК, базирующийся на методе [5], однако использующий при измерениях метод двухтактного интегрирования, обладающий высокой помехозащищенностью. Структура системы, реализующей метод [6], представлена на рис. 1. МК работает в штатном режиме – он заземлен и в цепи его питания имеется конденсатор С. Для повышения точности расчета энергопотребления МК его питание осуществляется от стабилизатора тока СтТ. Тогда при низком потреблении тока МК возможно опасное для МК возрастание напряжения на С, поэтому в схеме предусмотрена защита на эквиваленте стабилизатора (операционный усилитель ОУ, диод Д и опорный стабилизатор напряжения СтН).

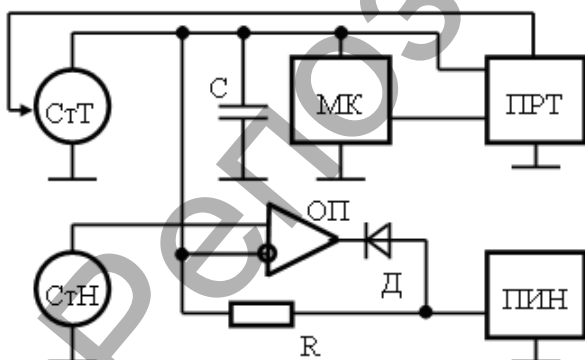


Рис. 1. Система измерения среднего энергопотребления МК

Перед собственно измерением энергопотребления МК проводится настройка СтТ. Для этого подсистема регулирования тока ПРТ запускает выполнение МК серии исследуемых команд, инструкций или программ и измеряет интеграл отклонения напряжения на МК от номинального, то есть от напряжения СтН U_{REF} . При отклонении интеграла от нуля выше заданного малого значения ПРТ изменяет ток СтТ для приведения интеграла отклонения напряжения на МК к нулю

$$\int_0^T (u_i - U_{REF}) dt \rightarrow 0, \quad (1)$$

где u_i – текущее напряжение на МК; T – время измерения.

Далее цикл настройки повторяется. При этом подсистема измерения напряжения ПИН измеряет интеграл $\int_0^T u_R dt$ падения напряжения на резисторе R. Если условие (1) выполняется, то результат измерения ПИН считается окончательным и записывается для дальнейшей обработки.

Для расчета энергопотребления МК $E_{МК}$ запишем баланс энергии в цепи его питания

$$E_{CmT} = E_{МК} + \Delta E_C + E_R, \quad (2)$$

где E_{CmT} – энергия, поступившая из СтТ; E_R – энергия, отведенная через резистор R при защите от перенапряжения; ΔE_C – энергия, поступившая из конденсатора (если за время измерения T напряжение на С упало) или накопленная им (если за время измерения T напряжение на С возросло).

В свою очередь ΔE_C можно определить по формуле

$$\Delta E_C = (C \cdot \Delta U_C^2) / 2, \quad (3)$$

где ΔU_C – изменение напряжения на конденсаторе С за время измерения T .

Если на решение о конце измерения наложить дополнительное условие $\Delta U_C \rightarrow 0$, то $\Delta E_C \rightarrow 0$. В этом случае (2) можно переписать как

$$E_{МК} = E_{CmT} - E_R, \quad (4)$$

E_R можно определить как

$$E_R = \int_{t=0}^T u_{МК} \cdot i_R \cdot dt = \int_{t=0}^T u_{МК} \frac{u_R}{R} dt, \quad (5)$$

где $u_{МК}$, u_R , i_R – текущие значения напряжений и тока МК и резистора R соответственно.

При выполнении условия $\Delta U_C \rightarrow 0$ получим $u_{МК} \approx U_{REF}$ и (5) можно преобразовать

$$E_R \approx \frac{U_{REF}}{R} \int_{t=0}^T u_R dt. \quad (6)$$

С учетом $u_{МК} \approx U_{REF}$ генерируемую СтТ энергию определим интегральными параметрами

$$E_{CmC} = U_{REF} \cdot I_{REF} \cdot T, \quad (7)$$

где I_{REF} – выходной ток СтТ после его настройки ПРТ во время предварительной настройки системы, его следует измерить амперметром достаточно высокой точности после окончания процесса измерения.

Окончательное уравнение, определяющее энергопотребление МК, будет иметь вид

$$E_{МК} = U_{REF} \cdot I_{REF} \cdot T - \frac{U_{REF}}{R} \int_{t=0}^T u_R dt. \quad (8)$$

При этом, следует отметить, что при вычислении $E_{МК}$ согласно (8), погрешность значения $E_{МК}$ определяется членами U_{REF} , I_{REF} , T , так как E_R – энергия, отведенная во время защиты МК. Поэтому, при правильном выборе емкости С, получаем $E_{МК} \gg E_R$, а U_{REF} , I_{REF} можно измерить вольтметром и амперметром постоянного тока с погрешностью 0,05% или даже меньше. Таким образом, потенциально предложенный в [6] метод измерения среднего энергопотребления МК имеет высокую точность.

Однако при выводе (8) был сделан ряд допущений. Очевидно, что одновременное выполнение условий (1), $\Delta U_C \rightarrow 0$ и требований защиты от действия помех частотой 50 Гц трудно выполнимо. Поэтому при определении времени измерения T необходим компромисс при выполнении следующих условий:

- 1) T должно быть кратным периоду питающей сети и учитывать его изменения;
- 2) окончание измерения возможно после некоторого заданного минимального значения T ;
- 3) T не должно превышать некоторое заданное максимальное значение;
- 4) окончание измерения возможно при условии, что МК выполнил известное число повторов исследуемых команд или программ;
- 5) окончание измерения возможно при условии, что $\int_0^T (u_i - U_{REF}) dt$ меньше допустимого значения;
- 6) окончание измерения возможно при условии, что ΔU_C меньше допустимого значения;

Условие п. 1 можно выполнить, например, путем запуска и окончания времени измерения T синхронно с однонаправленными переходами сети через нуль. Условия п.п. 2-4 требуют постоянного отслеживания времени и легко реализуются с помощью простого микроконтроллера, синхронизированного с исследуемым МК. Условие п. 5 требует работы ПРТ в каждом цикле исследования. Условие п. 6 требует постоянного слежения за разницей напряжений СтН и питания МК. Таким образом, п.п. 1-6 могут быть по отдельности достаточно легко выполнены. Однако их одновременное и точное выполнение маловероятно, что вынуждает искать компромисс за счет соответствующей установки допустимых значений отклонения условий от точного выполнения. Но отклонения условий от точного выполнения ведет к появлению методических погрешностей, поэтому необходимо исследование их зависимости от допустимых значений отклонений. Из-за того, что на погрешность измерения возможно влияние не только допустимых значений отклонений, но и их сочетания (взаимного влияния), исследование погрешностей становится довольно трудоемким и требует создания соответствующего специализированного стенда.

Целью статьи является разработка стенда исследования методических погрешностей системы измерения среднего энергопотребления МК, реализующей метод [6].

Экспериментальное исследование методических погрешностей не позволяет определить их зависимости от возможных параметров исследуемых МК и элементов схемы рис. 1. Поэтому был использован метод имитационного моделирования. Первым этапом разработки стенда было создание математической модели энергопотребления МК, учитывающей нелинейность МК как потребителя тока.

Математическая модель энергопотребления МК. Действительный характер энергопотребления МК разных типов определяется особенностями технологии изготовления. Поэтому для исследования методических погрешностей необходима обобщенная модель потребления тока МК, учитывающая его нелинейную зависимость от напряжения питания. Такая простая модель представлена на рис. 2. Она касается ограниченной области малых изменений напряжения питания МК (от U_{MIN} до U_{MAX}) и, соответственно, токов его потребления (от I_{MIN} до I_{MAX}). При этом текущий ток потребления $I_{МК}$ состоит из суммы минимального тока I_{MIN} , а также линейной I_{LIN} и нелинейной I_{NONLIN} составляющих

$$I_{МК} = I_{MIN} + I_{LIN} + I_{NONLIN} \quad (9)$$

В свою очередь I_{LIN} определяется как

$$I_{LIN} = k \cdot \Delta U_{МК} = k \cdot (U_{МК} - U_{MIN}), \quad (10)$$

где $U_{МК}$ и $\Delta U_{МК}$ – текущие напряжение на МК и его изменение;

k – коэффициент пропорциональности, определяемый как

$$k = (I_{MAX} - I_{MIN}) / (U_{MAX} - U_{MIN}). \quad (11)$$

Нелинейная составляющая I_{NONLIN} имитируется квадратичной зависимостью тока от напряжения питания – если $\Delta U_{МК} \leq 0,01 U_{МК}$ более сложные модели для определения методических погрешностей избыточны. Таким образом

$$I_{NONLIN} = A \cdot \Delta U_{МК}^2 + B \cdot \Delta U_{МК}, \quad (12)$$

где коэффициенты A , B можно определить, решая систему уравнений

$$\begin{cases} A(U_{MAX} - U_{MIN})^2 + B(U_{MAX} - U_{MIN}) = 0 \\ A((U_{MAX} - U_{MIN})/2)^2 + B(U_{MAX} - U_{MIN})/2 = \Delta_{MAX} \end{cases}, \quad (13)$$

где Δ_{MAX} – максимальное отклонение напряжения на МК от линейного.

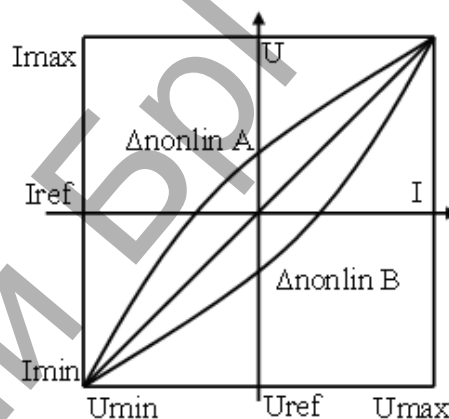


Рис. 2. Обобщенная модель энергопотребления МК

Необходимо отметить, что значения Δ_{MAX} для МК не нормируются, в литературе не определяется даже знак Δ_{MAX} . Поэтому исследованы оба варианта – если Δ_{MAX} имеет положительное значение (нелинейность типа А) и отрицательное значение (нелинейность типа В).

Стенд исследования методических погрешностей В качестве программного средства моделирования выбрана среда разработки и выполнения программ LabView [7], позволяющая довольно легко перейти от имитационного моделирования к натурному эксперименту. На рис. 3 представлена схема вычисления методической погрешности, вызванной нелинейностью потребления тока исследуемым МК при выполнении условия (1).

На схеме рис. 3 слева представлены формулы расчета методической погрешности, реализованные в среде LabView. Первая формула позволяет определить номинальное сопротивление МК R_{mk} . Она реализована блоками задания I_{nom} и U_{nom} и блоком деления R_{mk} . Результат вычисления этой и последующих формул, для дальнейшего анализа, записывается в массив (формирователь массива на рис. 3 обозначен штриховой линией). Вторая формула вычисляет текущую случайную составляющую значения $\Delta U_{МК}$, она реализована блоками задания ΔU , множителем $2 \cdot \Delta U$, генератором случайных чисел $Random$ и множителем u_2 . Третья формула вычисляет линейную и нелинейную части нелинейной составляющей напряжения на МК. Она реализуется блоками a , b задания коэффициентов A , B , определенных согласно (13), блоками умножения $Multiply1$, $Multiply2$ и блоком возведения в квадрат $Power of X$. Текущее значение напряжения $U_{МК}$ на МК получаем из четвертой формулы. Она реализована блоком вычитания $U_{nom} - \Delta U$ и сумматорами u_2 , u_3 . Текущее значение тока потребления МК получаем из пятой формулы. Она реализована блоком деления i . Шестая формула

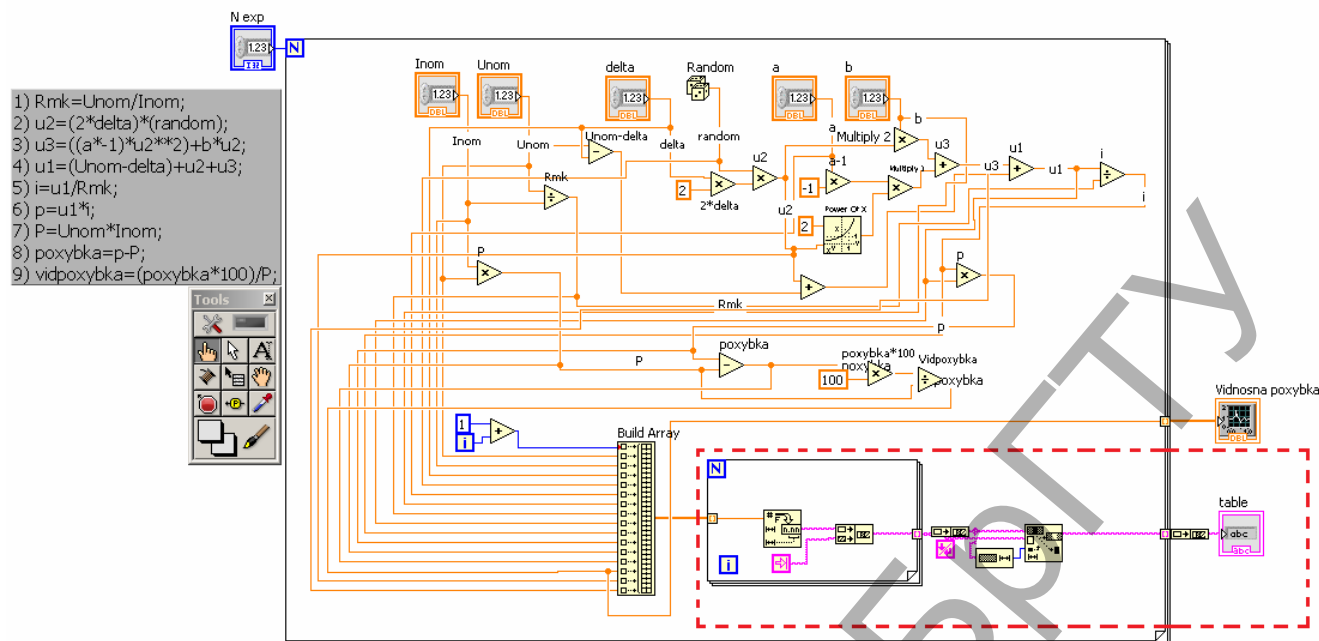


Рис. 3. Схема вычисления методической погрешности, вызванной нелинейностью потребления тока исследуемым МК

определяет текущую мощность МК (эквивалент энергии, потребляемой МК при данном сочетании параметров за время выполнения одной команды). Она реализована блоком умножения p . Седьмая формула вычисляет номинальную мощность потребления МК и реализована блоком умножения P . Вычисленное значение служит для определения абсолютного (формула восемь) и относительного (формула девять) отклонения потребляемой энергии от номинального значения за время выполнения одной команды.

Как уже указывалось, результаты вычисления по всем формулам записываются в массив для дальнейшего анализа. Кроме того, результат вычисления отклонения потребляемой МК энергии по девятой формуле записывается в отдельный массив для упрощения построения графиков.

Дальнейшую обработку данных можно вести с помощью средств среды разработки и выполнения программ LabView.

Заключение. Разработанный виртуальный стенд исследования методических погрешностей системы измерения среднего энергопотребления МК, реализующей метод [6], позволяет исследовать методическую погрешность из-за нелинейности МК, вызванную неточным соблюдением условия (1). Следует отметить, что, из-за отсутствия данных о нелинейности МК разных типов, придется исследовать отклонения потребляемой энергии от номинального значения не только для нелинейности типа А и В (см. рис. 2), но и для разных значений максимальной нелинейности (предполагается исследовать отклонения потребляемой энергии для изменений максимальной нелинейности Δ_{MAX} в пределах от 10 до 40% от отклонения напряжения $\Delta U_{МК}$ на исследуемом МК) и для разных значений допустимого отклонения напряжения $\Delta U_{МК}$ на исследуемом МК (предполагается исследовать допустимые отклонения в пределах от ± 10 до ± 50 мВ).

Кроме того, будут исследованы влияние количества повторов исследуемых команд или программ на среднее отклонение потребляемой энергии от номинального значения, а также влияние на это изменение изменения напряжения ΔU_C на конденсатора С (см. рис. 1) за время измерения T . Таким образом, по результатам ис-

следований можно будет в полном объеме оценить погрешности метода, предложенного в [6].

Научный руководитель – Кочан В.В., к.т.н., проф., каф. информационно-вычислительных систем и управления факультета информационных компьютерных технологий Тернопольского национального экономического университета (г. Тернополь, Украина).

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Borovi, A. Analysis of CPU's instructions energy consumption device circuits / A. Borovi, V. Konstantakos, V. Kochan [et al.] // The fourth IEEE international workshop on Intelligent Data Acquisition and Advancing Computing Systems (IDAACS'2007): proceedings / September 9–11, 2007, Dortmund, Germany. – Dortmund, 2007. – P. 42–47.
- Боровий, А. Інформаційно-вимірвальна система дослідження параметрів енергоспоживання мікропроцесорів: дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти // А.М. Боровий. – Тернопіль: THEY, 2012. – 266 с.
- Tiwari, V. Power Analysis of Embedded software: A First Step Towards Software Power Minimization / Vivek Tiwari, Sharad Malik and Andrew Wolfe // IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. – Vol. 2. – No. 4. – December 1994. – P. 437–445.
- Laopoulos, Th. Measurement of current variations for the estimation of software-related power consumption / Th. Laopoulos, P. Neofotistos, C.A. Kosmatopoulos, S. Nikolaidis // IEEE Transactions on instrumentation and measurement. – Vol. 52(4). – 2003. – P. 1206–1212.
- Патент 90922 України, МПК7 G05F 5/00, G01K 17/00. Пристрій вимірювання енергії імпульсних споживачів / А.М. Боровий, І.М. Майків, Р.В. Кочан, З.І. Домбровський, В.В. Кочан; заявник і патентовласник А.М. Боровий, І.М. Майків, Р.В. Кочан, З.І. Домбровський, В.В. Кочан – № а2008 06325; заявл. 13.05.08; опубл. 10.06.10, Бюл. №11. – 4 с.: іл.
- Спосіб вимірювання середньої енергії імпульсного споживача та пристрій для його реалізації: Заявка: № а201403292 Україна: G01R 5/00 заявники Осолінський О.Р., Кочан В.В., Домбровський З.І., Кочан О.В.; заявл. 31.03.2014.
- Официальная страница визуальной среды программирования LabVIEW: [Электронный ресурс]. – Режим доступу: <http://www.ni.com/labview/>

Материал поступил в редакцию 08.01.16

Presented a new method for measuring the average power consumption of microcontrollers and microprocessors in executing the instructions, commands, the fragments of programs, and programs in general. Presented the basic relations for determining the average power consumption which shows high potential accuracy of the proposed method. Showing six conditions to achieve high accuracy of the method, inaccurate performance of which leads to methodological errors. On the base of development environment and executing of programs LabView developed the virtual stand, allowing to explore the methodological error of the measurement system, implementing the proposed method of measuring the average power consumption of microcontrollers, during in the process of measurement. For the implementation of the stand developed a mathematical model of the nonlinear current consumption the investigated microcontroller.

УДК 004.5; 621.38

Дудкин А.А., Воронов А.А., Марушко Е.Е.

АЛГОРИТМ СШИВКИ КАДРОВ СЛОЯ ТОПОЛОГИИ СБИС ПО КЛЮЧЕВЫМ ТОЧКАМ

Введение. При изготовлении сверхбольших интегральных микросхем (СБИС) важным является контроль технологических процессов и экспресс-анализ их результатов. В качестве исходных данных используется изображение слоя интегральной схемы, которое может быть получено с помощью стандартных или специальных устройств и оборудования для получения цифровых изображений топологических слоев СБИС и предоставляется в виде множества прямоугольных фрагментов (кадров) изображения одного масштаба. Фрагменты изображения могут налагаться друг на друга, при этом известны размеры перекрытий. Особенностью многокадровых изображений топологических слоев СБИС является неоднородность яркости и увеличение объема данных из-за перекрытий кадров. При этом имеются также искажения, обусловленные эффектом перспективы, нечеткой фокусировкой на границе кадра, разной высотой и присутствием тени, поворота.

Этапы обработки изображения могут сильно варьироваться в зависимости от конкретной цели анализа, при этом обязательным этапом является формирование полного изображения по совокупности кадров (сшивка кадров) [1]. Задача сшивки формулируется следующим образом.

Растровое изображение задано в виде матрицы $[P_i, j]$ частично перекрывающихся кадров, $i = 1, \dots, n$, $j = 1, \dots, m$. Пусть неориентированный граф $G = (N, R)$ задает отношение соседства кадров (такие кадры частично перекрываются), где N – множество вершин графа, поставленных в соответствие кадрам, а R – множество ребер графа, задающих отношение соседства пары кадров. Для простоты будем рассматривать соседство лишь по вертикали и горизонтали. Тогда для матрицы $[P_i, j]$ размерности $n \times m$ имеем: $N = \{n_i, j \mid i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m\}$ – множество вершин, а $R = \{r_k \mid k = 1, 2, \dots, 2nm - m - n\}$ – множество ребер. Зададим S_h и S_v – размеры перекрытия соседних кадров по горизонтали и вертикали соответственно, а также допустимое отклонение перекрытия по горизонтали Δh и по вертикали Δv .

Определим функцию совмещения двух кадров P_1 и P_2 в перекрывающихся областях для разных положений кадров относительно друг друга как функцию расстояния $d(P_1, P_2, h, v)$ в некоторой метрике, где h и v – смещения кадров изображений относительно заданных S_h и S_v по горизонтали и вертикали соответственно, $-\Delta h \leq h \leq \Delta h$, $-\Delta v \leq v \leq \Delta v$. Для удобства запишем $d(P_1, P_2, h, v) = d(r_i, h, v)$, где r_i – дуга графа G , определяющая соседство между кадрами P_1 и P_2 .

Задача сшивки заключается в нахождении такого расположения кадров, чтобы значение функции g было минимальным:

$$g = \sum_{i=1}^{2nm-m-n} d(r_i, h, v) \rightarrow \min.$$

При проектных нормах меньше 1 мкм и использовании современных оптических и растрово-электронных микроскопов

возникают значительные трудности при формировании целого изображения всего слоя топологии кристалла алгоритмами [1] для современных микросхем, характеризующихся повышенной сложностью топологии. Поэтому разработка новых, более эффективных алгоритмов решения задачи сшивки из кадров слоя топологии микросхемы является актуальной.

В статье предлагается алгоритм, позволяющий существенно сократить перебор при решении задачи сшивки путем нахождения на кадрах множества ключевых точек, которые затем используются при нахождении оптимального совмещения кадров в областях их перекрытий.

Алгоритм сшивки. Алгоритм сшивки кадров слоя топологии ИС по ключевым точкам содержит два этапа:

1. Вычисление для множества ребер R графа G смещений кадров относительно друг друга на основе поиска ключевых точек.
2. Коррекция расположения кадров слоя. Выделение первого этапа необходимо для оптимизации вычислений путем распараллеливания.

Первый этап содержит следующие шаги для всех ребер из R в области перекрытия двух кадров P_1 и P_2 :

1. Выполняется поиск ключевых точек и вычисление их дескрипторов.
2. Выделяются соответствующие друг другу ключевые точки.
3. Удаляются ложные ключевые точки.
4. Вычисляется смещение кадра P_2 относительно позиции кадра P_1 .
5. Вычисляется расстояние d для пары кадров.
6. Вычисляется значение веса ребра как взвешенная сумма нормированного числа найденных ключевых точек и нормированной разности начального значения расстояния d_1 и значения d_2 после смещения. Вес ребра выполняет роль оценки качества найденного смещения для двух кадров.

Для выполнения первого этапа были протестированы следующие алгоритмы поиска ключевых точек и описания дескрипторов: SIFT, SURF [3], ORB [4]. Также сравнение проводилось для метода скользящего просмотра [4]. Тестирование проводилось на данных СБИС iW1696, 7 слоев, размер кадра 640x480 пикселей, размер области перекрытия 46x28, 506 кадров на один слой, общее число кадров 3542, 462 перекрытий на один слой, общее число перекрытий 3234, общий размер одного слоя данных 455 Мб, общий размер данных 3185 Мб. Результаты представлены в таблице. Как видно из таблицы, алгоритм SIFT показал наименьшее число ошибок поиска ключевых точек для изображений ИС и высокую производительность.

Таблица. Сравнение производительности и точности алгоритмов

Наименование алгоритма	Время выполнения, с	Верно определённые смещения, %
SIFT	47	96
SURF	52	79
ORB	45	76
Метод скользящего просмотра	22	72

Дудкин Александр Арсентьевич, д.т.н., доцент, зам. зав. лабораторией идентификации Объединенного института проблем информатики НАН Беларуси.

Воронов А.А., н.с., к.т.н. Объединенного института проблем информатики НАН Беларуси.

Марушко Евгений Евгеньевич, младший научный сотрудник Объединенного института проблем информатики НАН Беларуси.

Беларусь, 220012, г. Минск, ул. Сурганова, 6.